

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ДЛИТЕЛЬНО РАБОТАВШЕГО МЕТАЛЛА ПАРОПРОВОДОВ ИЗ СТАЛИ 12Х1МФ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

С.А. Лоскутов, Ю.Д. Корягин, Ю.А. Букин

Приведены результаты отечественных и зарубежных исследований кинетики поврежденности металла в зависимости от деформации ползучести, послужившие основанием для разработки шкал оценки степени развития порообразования и методики прогнозирования ресурса длительно работающего теплоэнергетического оборудования по микроповрежденности. Проведено исследование поврежденности металла в реальных условиях эксплуатации на электростанциях с использованием неразрушающего контроля методом реплик свыше тысячи гибов (наиболее напряженных элементов паропроводов) из сталей марок 12Х1МФ и 15Х1М1Ф энергоблоков мощностью 200 и 800 МВт и лабораторное исследование структуры и свойств более двадцати гнутых и прямых участков труб, вырезанных из паропроводов после длительных сроков службы. Установлено, что для оценки работоспособности гибов паропроводов необходимо, в отличие от рекомендаций действующих НТД, проведение исследований непосредственно гнутых, а не прямых участков труб. Анализ полученных данных свидетельствует, что накопленная в металле микроповрежденность является интегральным критерием, отражающим работоспособность в зависимости от всех эксплуатационных факторов (температура, давление, срок работы), геометрических параметров (толщина стенки, искажение формы сечения) и состояния металла (структура, свойства) конкретного элемента оборудования. Выполненное исследование подтверждает наибольшую информативность и достоверность металлографического метода оценки поврежденности металла, подверженного деформации ползучести, для диагностирования состояния высокотемпературных элементов теплоэнергетического оборудования, определения возможности их дальнейшей эксплуатации или необходимости проведения восстановительной термической обработки.

Ключевые слова: паропроводы, гибь, ползучесть, микроповрежденность, диагностирование, прогнозирование ресурса.

Металл элементов современных мощных энергоблоков тепловых электростанций, работающих при высоких температурах и давлениях, в процессе длительной эксплуатации претерпевает значительные структурные изменения, приводящие к снижению его дальнейшей работоспособности.

Наиболее широкое применение для паропроводов в отечественной энергетике получила сталь перлитного класса марки 12Х1МФ.

После рекомендуемого режима термической обработки, заключающейся в нормализации и высокотемпературном отпуске, оптимальная структура этой стали в состоянии поставки должна содержать отпущенный бейнит и перлит плюс феррит. Микроструктура стали 12Х1МФ по ТУ 14-3-460-75 и ТУ 14-3Р-55-2001, по которым осуществлялась поставка труб заводами-изготовителями, оценивается содержанием отпущенного бейнита и перлита в количестве от 100 (1-й балл) до 15 % (5-й балл).

Длительное воздействие температурно-силовых факторов вызывает процессы сфероидизации бейнитной и перлитной составляющих, перехода легирующих элементов из твердого раствора в карбидную фазу, изменения её состава и укрупнения карбидов, изменения состояния границ зёрен. Эти структурные изменения приводят к снижению кратковременных прочностных свойств и жаропрочности.

Кроме того, в процессе деформации ползучести в структуре металла в результате микросдви-

гов происходит образование несплошностей в виде микропор по границам зёрен. Порообразование является основным механизмом разрушения металла оборудования, работающего в условиях ползучести. С развитием деформации накопление поврежденности в металле, по современным представлениям, – это процесс зарождения, роста микропор, образования их цепочек, при дальнейшем слиянии которых возникают микро-, а затем и макротрещины.

Степень сфероидизации от 1-го (плотный перлит пластинчатого строения) до 6-го балла (полная сфероидизация) и микроповреждаемость от 1-го (отсутствие пор) до 7-го балла (макротрещины, выявляемые УЗК) классифицируются в соответствии со шкалами ОСТ 34-70-690-96.

Существует достаточно достоверная взаимосвязь между стадиями ползучести и поврежденности металла. При ускоренной ползучести (переход к третьей стадии) наблюдается образование цепочек микропор (5-й балл) и микротрещин (6-й балл), которые на стадии предразрушения превращаются в макротрещины (7-й балл).

Согласно типовой инструкции [1] допустимая повреждаемость микропорами не должна быть выше 4-го балла (множество пор, ориентированных по границам зёрен).

Многочисленные исследования состояния металла паропроводов при длительной наработке показывают, что процессы сфероидизации и поро-

образования в нём могут достигать предельно допустимой величины. Наиболее значительные изменения в силу напряжённо-деформированного состояния имеют место в растянутой зоне гибов, которые являются самыми слабыми и часто повреждаемыми элементами паропроводов.

На основании вышесказанного при выработке нормативных сроков, установленных действующей НТД, проводится диагностика состояния металла гибов, по результатам которой принимается решение о возможности их дальнейшей эксплуатации.

В связи с постоянно возрастающим количеством оборудования, требующего проведения замены, актуально применение альтернативных методов, обеспечивающих реанимацию изношенного металла для обеспечения его надёжности и продления ресурса.

В соответствии с [2] таким методом узаконена восстановительная термическая обработка (ВТО), исследование возможности применения которой и последующее внедрение на электростанциях было начато ещё в 70-е годы прошлого столетия.

Техническое обоснование и совершенствование технологии ВТО, а также закономерности образования пор при ползучести подробно освещены в работах П.А. Антикайна, разработавшего указанный метод [3, 4].

Согласно представлениям о превращениях, происходящих в перлитных сталях, для состаренного при эксплуатации металла получение оптимальной структуры и перевод легирующих элементов из карбидов обратно в твёрдый раствор возможны вследствие полной перекристаллизации при нагреве выше A_{c3} и охлаждении с заданной скоростью, т. е. нормализации.

В [5] указывается, что при проведении ВТО весьма важна уточнённая оценка фактического состояния металла, подвергаемого ВТО, поскольку регенерация микроструктуры возможна на любой стадии ползучести, а заживление микроповреждённости зависит от степени её развития. Так, для металла с повреждённостью 2–3-го балла достаточно проведение однократной нормализации, а с повреждённостью 4–5-го балла требуется более сложный режим термообработки, т. е. для каждого конкретного случая необходима корректировка режима ВТО.

В исследовании [6] показана возможность заращивания более крупных пор по сравнению с обычной ВТО циклической восстановительной термической обработкой, однако в производственных условиях этот метод из-за высокой трудоёмкости практически не пригоден.

В большинстве случаев ВТО проводится, когда микроповреждённость металла не превышает предельно допустимый 4-й балл, хотя некоторые авторы [7] считают целесообразным её проведение при достижении повреждённости 4–5-го балла. Для такого металла Всероссийским теплотехниче-

ским институтом (ВТИ) предложено проведение двойной нормализации: первой, более высокотемпературной для заращивания микропор и гомогенизации аустенита, и второй – при более низкой температуре для уменьшения размера зерна [8].

В данной статье приводятся результаты работы, проведённой при выполнении ВТО для гибов главных паропроводов $\varnothing 325 \times 38$ мм из стали 12Х1МФ двух энергоблоков мощностью 200 МВт после эксплуатации в течение 240 (блок № 1) и 225 (блок № 2) тыс. ч при параметрах 545 °С и 14,0 МПа.

Нормативный (парковый) ресурс данных гибов при указанных параметрах составляет 210 тыс. ч.

Термическая обработка выполнялась без демонтажа паропровода.

Нагрев осуществлялся индукционным способом электротермической установкой повышенной частоты (2400 Гц) мощностью 250 кВт.

В качестве неподвижного индуктора использовали гибкие водоохлаждаемые кабели.

Необходимая скорость охлаждения при нормализации обеспечивалась продувкой от воздушной магистрали.

В соответствии с требованиями действующей НТД было выполнено обследование гибов неразрушающими методами контроля и исследование двух макетных гибов с разрезкой их до и после ВТО для определения структуры, кратковременных механических и жаропрочных свойств.

Исследование микроструктуры металла проводилось на сколах, взятых со сжатой части гибов, после приготовления металлографических шлифов в лабораторных условиях.

В процессе микроструктурного анализа металла оценивались количество и балл сфероидизации перлитной составляющей, величина ферритного зерна, максимальный размер карбидов. Величина зерна определялась по ГОСТ 5639–82, степень сфероидизации перлита по шкале Приложения Е ОСТ 34-70-690-96, балл микроструктуры по шкале № 3 Приложения 2 ТУ 14-3Р-55-2001.

Определение микроповреждённости металла проводилось металлографическим методом, включающим операции зачистки, приготовления шлифов на вершине растянутой зоны и переходе сгиба на прямой участок, многократное травление и переполіровку, снятие реплик и последующий анализ их в лабораторных условиях. Оценка повреждённости выполнялась в соответствии со шкалой Приложения Ж ОСТ 34-70-690-96 при увеличении 500 и 1000.

Замер твёрдости проводился после зачистки на сжатой части ггиба переносным электронным твердомером ТЭМП-2.

В качестве макетных использовались гобы из числа заменённых на паропроводах блоков № 1 и № 2, с повреждённостью структуры соответственно 4–5-го и 3-го балла.

Исследование до и после ВТО включало оп-

ределение химического состава и кратковременных механических свойств, карбидный анализ, оценку микроструктуры и жаропрочных свойств.

Химический и карбидный анализы выполнялись аналитическим методом.

Металлографическое исследование микроструктуры проводилось на шлифах по всей толщине стенки трубы.

Механические свойства металла до и после ВТО определялись на стандартных поперечных образцах при комнатной и повышенной температурах по ГОСТ 1497–84 и ГОСТ 9651–81.

Испытания на жаропрочность проводились по ГОСТ 10145–85 на продольных образцах.

Исследование металла сколов показало, что в процессе длительной эксплуатации в структуре всех гибов произошла сфероидизация до 5–6-го балла.

Полная сфероидизация (6-го балла) наблюдалась в гibaх блока № 1, имевшего большую наработку. Их микроструктура состояла из феррита и карбидов, расположенных в теле зерна и по границам зёрен. Величина зерна соответствовала 6–7-му баллу, максимальный размер карбидов не превышал 5 мкм.

Микрповреждённость металла этих гибов в растянутой зоне выявила значительное количество пор, расположенных цепочками по границам зёрен, что соответствует 4–5-му баллам.

Микрповреждённость металла в растянутой зоне гибов блока № 2 не превышала 3-го балла.

Твёрдость металла гибов блока № 1 находилась в интервале НВ 131–151, блока № 2 – НВ 124–153.

Анализ результатов неразрушающего контроля металла паропровода блока № 2 показал возможность проведения ВТО металла гибов по режиму: однократная нормализация при 1020–1060 °С, выдержка 40 мин и последующий отпуск при температуре 710–740 °С с выдержкой в течение 60 мин.

Для практики весьма важное значение приобретает эксперимент по исследованию возможности восстановления структуры и свойств металла с повреждённостью 4–5-го балла, которая была выявлена на гibaх паропровода блока № 1.

Данных по ВТО металла с такой повреждённостью в настоящее время недостаточно.

Для этих гибов был выбран режим двукратной нормализации с последующим отпуском:

- первая нормализация при 1040–1070 °С, выдержка 30 мин,
- вторая нормализация при 980–1000 °С, выдержка 40 мин,
- отпуск при 710–740 °С, выдержка 60 мин.

Во всех случаях скорость охлаждения при нормализации задавалась в пределах 5–9 °С/мин.

Выбранные режимы были согласованы с Всероссийским теплотехническим институтом (ВТИ) – разработчиком инструкции по ВТО.

Повторный контроль после ВТО показал, что в результате проведённой нормализации в микроструктуре металла произошли положительные изменения. Микропоры, образовавшиеся в процессе эксплуатации в растянутой зоне гибов, полностью исчезли.

Восстановленная структура относится к 4–5-му баллу шкалы сдаточных микроструктур. Значения твёрдости составили НВ 134–159, проявив некоторую тенденцию к повышению.

В качестве примера на рис. 1 приведены фотографии микроструктуры металла одного из гибов до и после проведения ВТО.

Полученные результаты свидетельствуют о соответствии качества проведённой ВТО требуемым критериям.

Химический анализ металла макетных гибов подтвердил соответствие его требованиям ТУ на сталь 12Х1МФ. Результаты карбидного анализа показали, что в результате произошедших при ВТО фазовых превращений содержание легирующих элементов Cr и Mo в карбидах уменьшилось (в особенности Cr, почти в 2 раза), а V практически осталось неизменным (табл. 1).

Микроструктура металла обоих гибов после эксплуатации состояла из 100 % феррита и карбидов, распределённых по телу и границам зёрен, степень сфероидизации достигла 6-го балла. Величина зерна соответствовала 7–8-му баллу.

В результате ВТО произошло образование перлита в количестве 25–30 % плотного строения, карбиды равномерно распределились по полю и границам ферритных зёрен. Такая структура идентифицируется 3–4-м баллом сдаточных микроструктур стали 12Х1МФ.

Микропоры, имевшиеся в растянутой зоне металла гибов до проведения ВТО, полностью залечены, в том числе и гiba № 1 с микрповреждённостью 4–5-го балла.

Под воздействием нагрева величина зерна увеличилась до 5–6-го балла.

Результаты механических испытаний и требования к стали 12Х1МФ приведены в табл. 2 и 3.

Анализ полученных данных показал, что, как правило, после ВТО наблюдается повышение механических характеристик. Некоторое исключение составили лишь значения δ при 20 °С, $\sigma_{0,2}$ и KCU при 550 °С у металла гiba № 1, при этом находящиеся на высоком уровне.

Все без исключения механические свойства после ВТО отвечают требованиям ТУ.

Наиболее важной расчётной характеристикой при определении ресурса работоспособности теплоустойчивых сталей является длительная прочность. Такие испытания были проведены в отделении металлов ВТИ. По полученным данным сравнительные испытания на жаропрочность образцов макетных гибов до и после ВТО показали увеличение времени до разрушения в несколько раз для металла, подвергнутого восстановительной термо-

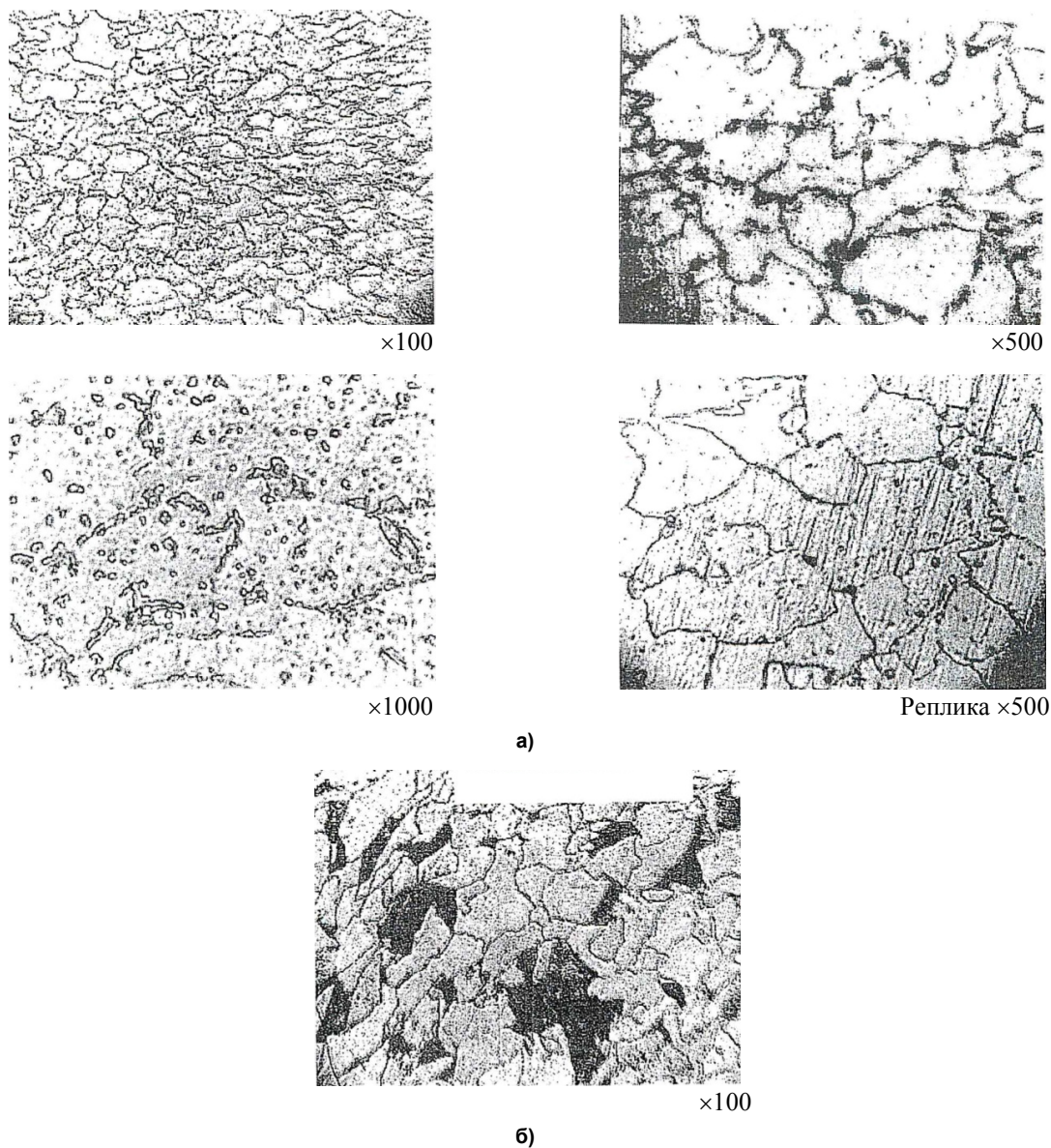


Рис. 1. Микроструктуры металла гига № 1 до (а) и после (б) ВТО

Таблица 1

Химический и карбидный анализы металла гибов

Наименование	Содержание химических элементов в металле и карбидах, %							
	углерод	марганец	кремний	сера	фосфор	хром	молибден	ванадий
Блок № 1								
Химический анализ								
Гиб № 1	0,12	0,56	0,20	0,015	0,013	1,20	0,24	0,21
Карбидный анализ								
До ВТО	–	–	–	–	–	27,5	37,5	61,9
После ВТО	–	–	–	–	–	15,8	29	64
Блок № 2								
Химический анализ								
Гиб № 2	0,10	0,55	0,22	0,015	0,014	1,21	0,24	0,23
Карбидный анализ								
До ВТО	–	–	–	–	–	26,4	33	69
После ВТО	–	–	–	–	–	13,3	29	66
ТУ 14-3Р-55-2001	0,10–0,15	0,40–0,70	0,17–0,37	Не более 0,025	Не более 0,035	0,90–1,20	0,25–0,35	0,15–0,30

Таблица 2

Механические свойства металла макетногогиба № 1

Место отбора образцов	$T_{\text{исп}}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_B, \text{МПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\delta_5, \%$	$\psi, \%$	$KCU, \text{кгс}\cdot\text{м}/\text{см}^2$
Растянутая зонагиба до ВТО	20	466	276	32,7	74,4	11,0
	550	294	230	22,36	70,8	18,6
Растянутая зонагиба после ВТО	20	501	296	28,8	75,5	15,3
	550	309	225	24,2	84,1	10,1
ТУ 14-3Р-55-2001, 20 °С		450–650	280	19,0	50,0	50

Таблица 3

Механические свойства металла макетногогиба № 2

Место отбора образцов	$T_{\text{исп}}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_B, \text{МПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\delta_5, \%$	$\psi, \%$	$KCU, \text{кгс}\cdot\text{м}/\text{см}^2$
Растянутая зонагиба до ВТО	20	491	326	24,5	70,9	16,0
	550	258	219	14,7	64,3	23,8
Растянутая зонагиба после ВТО	20	532	334	28,2	78,1	24,5
	550	328	256	19,7	78,1	26,0
ТУ 14-3Р-55-2001, 20 °С		450–650	280	19,0	50,0	5,0

обработке, хотя характеристики длительной прочности оказались несколько ниже, чем у длительно работавшего металла. Однако они остаются на уровне, характерном для стали 12Х1МФ в состоянии поставки.

Полученные значения предела длительной прочности, экстраполированного на срок 10^5 часов при температуре 550 °С, металла макетногогиба блока № 1 после ВТО увеличились с 60 до 80 МПа (рис. 2), а блока № 2 – с 50 до 80 МПа (рис. 3).

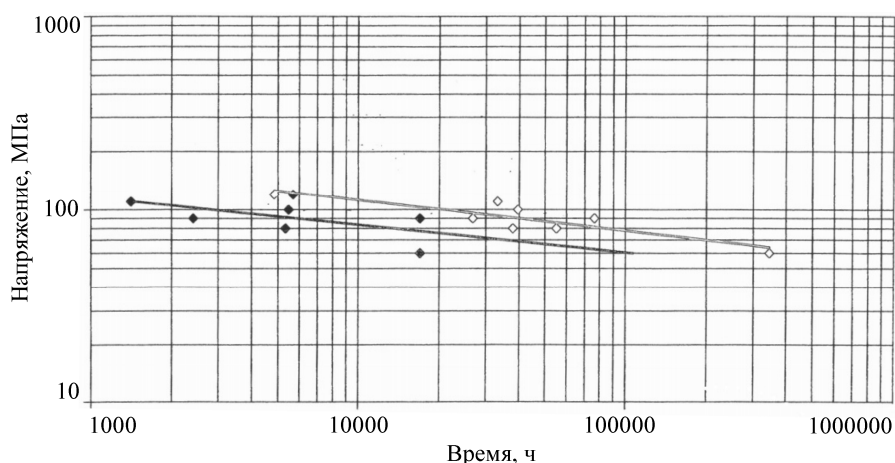


Рис. 2. Длительная прочность при 550 °С стали 12Х1МФ растянутой зоныгиба блока № 1 до и после ВТО

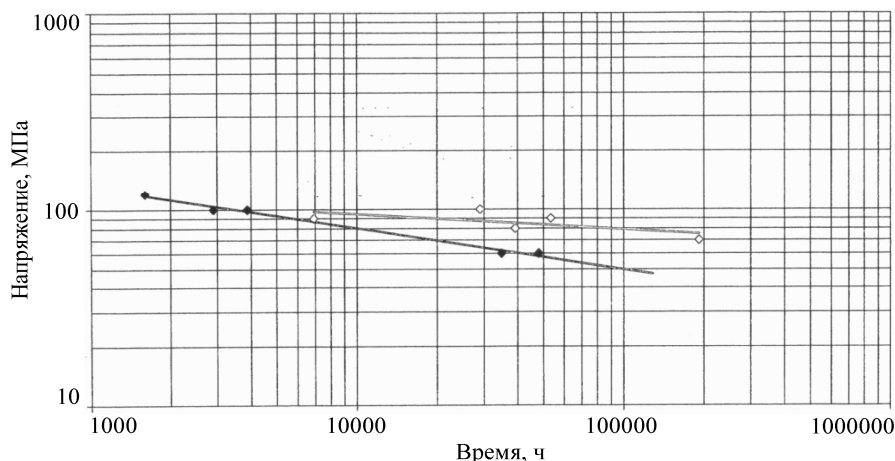


Рис. 3. Длительная прочность при 550 °С стали 12Х1МФ растянутой зоныгиба блока № 2 до и после ВТО

Вывод

Комплекс проведённых исследований свидетельствует о том, что при действии приведённых напряжений в гихах паропроводов блоков 200 МВт на уровне 50–60 МПа после выполненной восстановительной термической обработки они обеспечивают требуемый нормативный запас прочности (1,25) на срок не менее 10^5 часов при номинальных рабочих параметрах пара 550 °С и 14,0 МПа.

Литература

1. РД 10-577-03 Типовая инструкция по контролю металла и продлению срока службы основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций.
2. Трахтман, Б.Л. ВТО паропроводов – способ увеличения их работы: информ. сообщение / Б.Л. Трахтман. – АО «Фирма ОРГРЭС».
3. Антикайн, П.А. Совершенствование технологии восстановительной термической обработки паропроводов из перлитных сталей / П.А. Антикайн // Теплоэнергетика. – 1993. – № 11. – С. 2–6.
4. Антикайн, П.А. Металлы и расчёт на

прочность котлов трубопроводов / П.А. Антикайн. – 4-е изд. – М.: Энергосервис, 2001. – 153 с.

5. Злепко, В.Ф. Влияние восстановительной термической обработки на свойства стали 12Х1МФ / В.Ф. Злепко, К.Р. Линкевич, Т.А. Швецова // Теплоэнергетика. – 2001. – № 6. – С. 68–70.

6. Куманин, В.И. Устранение повреждённости металлических материалов с помощью восстановительной обработки / В.И. Куманин, Л.А. Ковалёва, М.Л. Соколова // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1995. – № 4. – С. 7–11.

7. Должанский, П.Р. Опыт проведения ВТО паропроводов с применением печного нагрева / П.Р. Должанский, С.Э. Доброхотов // Науч.-техн. конф. «Металл оборудования ТЭС. Проблемы и перспективы» (30 окт. – 2 нояб. 2006 г.): сб. докл. – М.: ОАО ВТИ, 2006. – С. 121–123.

8. Швецова, Т.А. Опыт применения восстановительной термической обработки паропроводов / Т.А. Швецова, К.К. Кройцер // Науч.-техн. конф. «Металл оборудования ТЭС. Проблемы и перспективы» (30 окт. – 2 нояб. 2006 г.): сб. докл. – М.: ОАО ВТИ, 2006. – С. 116–120.

Лоскутов Сергей Алексеевич, аспирант кафедры физического металловедения и физики твёрдого тела, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); sergantik@74.ru.

Корягин Юрий Дмитриевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой физического металловедения и физики твёрдого тела, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); koriaginyd@susu.ac.ru.

Букин Юрий Александрович, начальник лаборатории металлов, ООО «ЗАПСИБОРГРЭС» (г. Тюмень); bukin.37@mail.ru.

Поступила в редакцию 23 сентября 2014 г.

**Bulletin of the South Ural State University
Series "Metallurgy"
2014, vol. 14, no. 4, pp. 45–51**

OPTIMIZATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF 12Kh1MF STEEL PIPELINES BY THE USE OF REGENERATIVE HEAT TREATMENT AFTER LONG SERVICE LIFE

S.A. Loskutov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, sergantik@74.ru,

Yu.D. Koryagin, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, koriaginyd@susu.ac.ru,

Yu.A. Bukin, LLC "ZAPSIBORGRES", Tyumen, Russian Federation, bukin.37@mail.ru

The article presents the results of domestic and foreign studies of kinetics of metal damage depending on creep flow which served as the basis for the development of assessment scales of a pore forming degree as well as methods of resource forecasting of long-running power equipment in microdamaging. Research was carried out to study metal damage in real operating conditions at power plants by nondestructive checking with the use of the replica method of over a thousand of bends (the most stressed elements of steam lines) of MP and HP

steel grades of power units with the capacity of 200 and 800 MW and a laboratory study of the structure and properties of over twenty curved and straight pipe sections cut from steam lines after a long service life. It was determined that to evaluate the efficiency of steam line bends it is necessary, in contrast to recommendations of applicable documentation, to conduct the research of bent pipe sections rather than of straight ones. The analysis of the data obtained shows that microdamaging accumulated in metal is an integral criterion of the efficiency depending on all operational factors (temperature, pressure, time), geometrical parameters (wall thickness, distortion-shaped cross-section) and metal state (structure, properties) of a particular equipment element. The research performed confirms the highest information content and reliability of the metallographic method of damage assessment of metal susceptible to creep flow in order to diagnose the state of high-temperature elements of power equipment, and to determine the possibility of their further operation or the need for conducting thermal treatment rehabilitation.

Keywords: microdamaging, creep flow, metallographic method, bent pipe sections.

References

1. RD 10-577-03. *Tipovaya instruktsiya po kontrolyu metalla i prodleniyu sroka sluzhby osnovnykh elementov kotlov, turbin i truboprovodov teplovykh elektrostantsiy* [Guideline Document 10-577-03. Standard Instructions on Control of Metal and Prolongation of Service Life of Key Elements of Boilers, Turbines and Pipelines of Heat Power Plants].
2. Trakhtman B.L. *VTO paroprovodov – sposob uvelicheniya ikh raboty* [Regenerative Heat Treatment of Steam Pipelines as a Method of Increasing Their Service Life]. AO “Firma ORGRES”.
3. Antikayn P.A. [Improvement of Regenerative Heat Treatment Technology of Steam Pipelines from Pearlitic Steels]. *Teploenergetika*, 1993, no. 11, pp. 2–6. (in Russ.)
4. Antikayn P.A. *Metally i raschet na prochnost' kotlov truboprovodov* [Metals and Strength Calculation of Pipeline Boilers]. 4th ed. Moscow, Energoservis Publ., 2001. 153 p.
5. Zlepko V.F., Linkevich K.R., Shvetsova T.A. [Effect of Regenerative Heat Treatment on the Properties of 12Kh1MF Steel]. *Teploenergetika*, 2001, no. 6, pp. 68–70. (in Russ.)
6. Kumanin V.I., Kovaleva L.A., Sokolova M.L. Curing Damage in Metallic Materials by Means of Regenerative Heat Treatment. *Metal Science and Heat Treatment*, 1995, vol. 37, no. 4, pp. 136–140. doi: 10.1007/BF01189468.
7. Dolzhanskiy P.R., Dobrokhotoy S.E. [Experience in Regenerative Heat Treatment of Steam Pipelines Using Furnace Heating]. *Metall oborudovaniya TES. Problemy i perspektivy: sbornik dokladov* [Metal of Thermal Power Plant Equipment. Problems and Prospects: Collection of Reports]. Moscow, OAO VTI Publ., 2006, pp. 121–123. (in Russ.)
8. Shvetsova T.A., Kroytser K.K. [Experience in Regenerative Heat Treatment of Steam Pipelines]. *Metall oborudovaniya TES. Problemy i perspektivy: sbornik dokladov* [Metal of Thermal Power Plant Equipment. Problems and Prospects: Collection of Reports]. Moscow, OAO VTI Publ., 2006, pp. 116–120. (in Russ.)

Received 23 September 2014